

博 士 論 文 要 旨

海底地すべりの形状及び運動が 津波の発生に与える影響に関する研究

Study on the influence of shape and motion of
submarine landslide on tsunami generation

環境科学専攻

環境創成講座

氏 名

木場 正信

主任指導教員氏名

由比 政年

Abstract

In order to advance the estimation of the scale of the tsunami caused by submarine landslide, an efficient numerical analysis method was developed and systematic analysis was done on the relationship between the landslide and the tsunami amplitude. Fundamental problem of rigid body landslide over constant water depth and was one-dimensionally modeled. By solving the waveform kinematically based on linear theory, an efficient model that can analyze the occurrence and propagation of tsunami at high speed was developed. Regarding the response of the water surface to the fluctuation of the seabed, the efficiency of the analysis was improved by moving the initial landslide shape to which the filter was applied by Kajiura (1963). Next, a conceptual model on the relationship between the landslide motion and the water level fluctuation was constructed, and the relation between the landslide parameters and the tsunami amplitude was derived by the synthesis of a number of numerical calculation results. Finally, retrogressive landslides starting from the lower part of the slope were focused and the relationship between the number of divisions of the landslide and the difference in movement onset time and the generated tsunami water level were analyzed. In many cases, tsunami level due to the rigid body motion of single block was the largest, but it was found that appropriate time lag causes amplification of the water level of about 10% on the opposite direction of landslide movement.

論文要旨

1. 目的

海底地すべりに起因する津波は、断層運動による地震津波より局所的に大規模となる場合があり津波防災上の課題となっている。海底地すべりに伴う津波規模の推定に関しては、水理模型実験や数値解析に基づく検討例があるが、海底地すべりは形状や運動形態が様々で多くのパラメータを含むため、体系的に分析されたとは言えない。本研究は、1)パラメータスタディを効率的に実施するための数値解析手法の構築、2) 多数の解析結果に基づく地すべりと津波高さの関係の分析を主な目的として実施した。なお、主な検討対象は、移動体が流動化せずほぼ一体となって移動する津波発生効率の高い地すべりとし、津波規模については発生直後の波源域周辺での水位に着目した。

2. 解析手法

海底地すべりに起因する津波を解析するため、一定水深の海域を 1 次元的に差分モデル化し、海底を地すべり体が剛体移動する基本問題を設定した (図 1). 現実の地すべりは様々な形状を示すが、上昇波と下降波の生成領域が明確であり分析に適していることや、海底地形変化速度が有限となることを考慮し、台形モデルと三角形モデルを採用した (図 2) 設定した台形は前面と後面の勾配が大きく矩形に近く、勾配を大きくしていくと最終的に三角形となるため、検討対象は前後面の勾配として生じる範囲の両端のケースに位置づけられる。

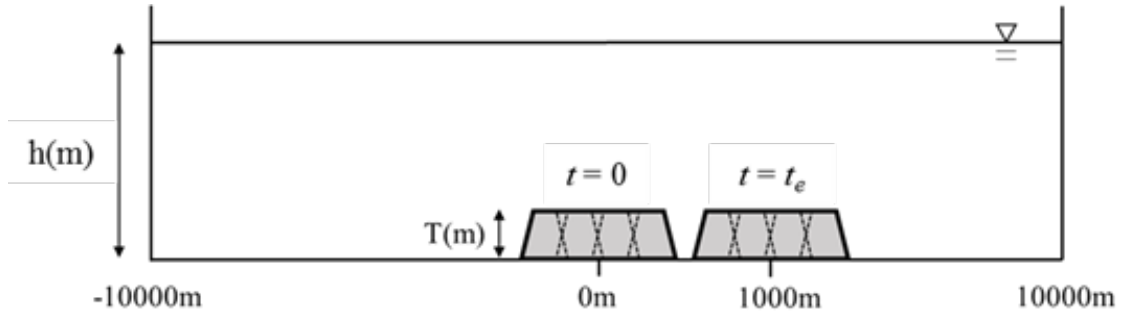


図 1 解析領域及び地すべり設定のイメージ

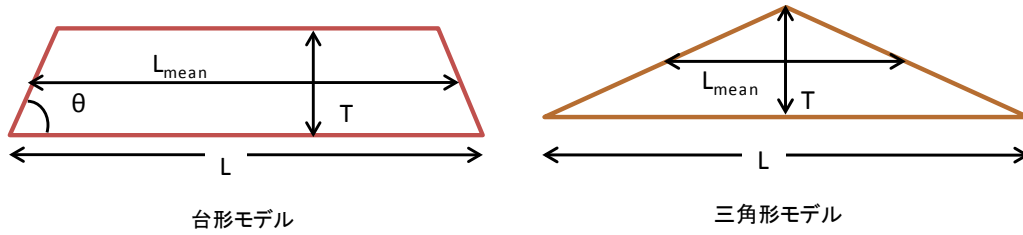


図 2 地すべりモデルの形状と形状パラメータの定義

地すべり移動速度は、ゼロで始まり時間 $t = t_p$ でピーク速度 u_p 、時間 $t = t_e$ で再びゼロとなる三角形分布とした。このとき、地すべり体の移動距離 l は $u_p \cdot t_p$ となる。加減速パラメータ $\alpha = t_p/t_e$ を用いて t_p の偏りを表す。

津波の伝播を解くため、水面に生じた波が均等に分裂し、正負の方向に長波の波速で進行する線形モデルを作成した。基本式は、

$$\eta(x, t) = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{\eta_0 \left(x_0, \left(t - \left| \frac{x - x_0}{c} \right| \right) \cdot H \left(t - \left| \frac{x - x_0}{c} \right| \right) \right)}{2} dx_0$$

である。ここで、 η は位置 x 、時刻 t における水位、 H はヘビサイド関数、 $\eta_0(t)$ は位置 x_0 、時刻 t において水面に生じた水位、 c は長波の波速である。計算に先立ち、ゴドゥノフ型有限体積法を適用した非線形モデルとの比較を行い、本研究で対象とする問題に対し同様の結果が得られることを確認した。

3. 海底地盤変位と海面変位の関係に関する基礎検討

断層運動に起因する津波の数値シミュレーションにおいては、海底変位が生き写しに海面に反映されると仮定し、それを水面の初期条件とする場合が多い。しかし、海面変位は海底変位の範囲より広域に及び、海底変位と同一とならない。Kajiura (1963)は、非圧縮非粘性流体を仮定した海面変位の理論解を導出した。離散化した 1 次元表現では、以下の関係となる。この式は空間的なローパスフィルターとして作用し、水深が大きく波長が短いとき減衰効果が強く生じる。

$$\eta_k = \sum_i \frac{\Delta x}{h_i} \sigma_i D_i G \left(\frac{|r_k - r_i|}{h_i} \right), G(r) = \frac{2}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n (2n+1)}{\{(2n+1)^2 + r^2\}^{\frac{3}{2}}}, r = |r_k - r_i| = \sqrt{(x_k - x_i)^2}$$

ここで、 η は水位、 x は位置、 h は水深、 D は海底の上下変動、 G は海底面変位の時空間に関するデルタ関数入力に対する海面変動を表すグリーン関数である。

G は無限級数の形式となっているため、実際の計算では有限の項数 N を用いることになる。基本ケース(台形モデル, 水深 200m, 長さ 1000m)を対象とした線形計算結果(表 1)に基づき、積分回数 400 回に対する誤差が 10^{-5} 未満となるよう、以下の計算では $N=50$ を基本とした。

表 1 Kajiura フィルター級数表現の積分回数による最高・最低水位の比(積分回数 400 のときを 1 とした比率)

積分回数	X<0		X>0	
	max	min	max	min
400	1	1	1	1
100	0.999998	1.000003	1.000001	0.999999
50	0.999976	1.000043	1.000009	0.999993
20	1.000111	1.000945	1.000206	0.999879
10	1.002913	1.005312	1.001286	0.999916

次に、地すべり形状、長さ及び水深を変化させた 2,000 ケースを対象に、地すべりを含む海底地形に Kajiura フィルターを適用した。フィルター適用前後の空間波形の最大振幅の比率を比較すると、図 3 のようになり、地すべり形状による差異は L_{mean}/h が 1~10 の範囲で比較的明瞭であり、三角形モデルの方で減衰が強い。また、 L_{mean}/h が 10 以上の範囲で縦軸 1 に漸近する関係であることがわかった。両軸の自然対数を 4 次関数で回帰すると定性的、定量的に良好な近似が得られた。関係式は 4 章に示す。

1 次元の水位及び海底地形の連続の式に基づく理論的検討に基づき、海底地すべりに起因する津波シミュレーションにおいては、地すべりの初期形状に対して Kajiura フィルターを適用し、フィルター後の形状をもつ地すべりが移動するとして取り扱えば、解析中に一度だけフィルターの計算を行えばよいことを明らかにし、一様水深のもとでの数値シミュレーションによりその妥当性を確認した(図 4)。この関係は、地すべりの移動範囲内で水深及び地すべり形状の変化が小さければ成立するため、計算の飛躍的な高速化が可能となる。

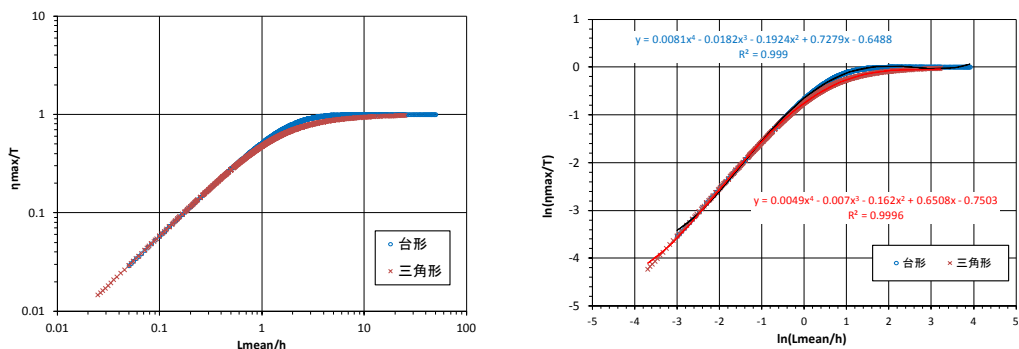


図 3 地すべり平均長／水深とフィルター後／フィルター前の最大変位量の関係

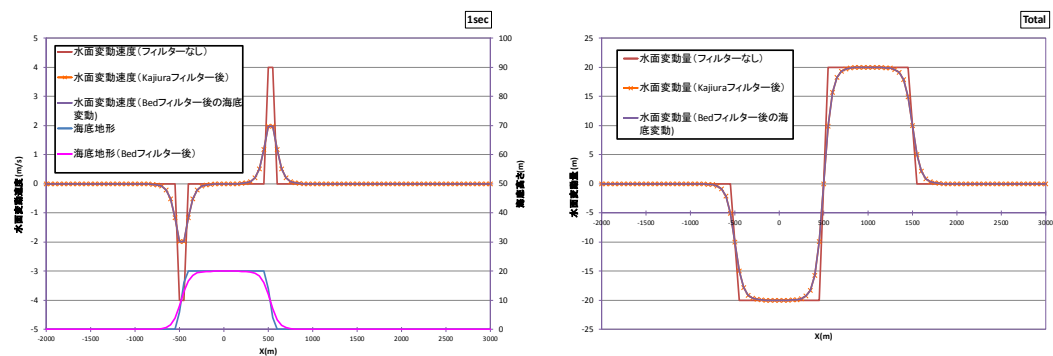


図 4 フィルターをかけるタイミングによる水面変動の比較（台形モデル，水深 100m）

左：地すべり開始 1 秒後，右：50 秒間の累積

4. 線形モデルを用いた海底地すべりによる造波特性の解析

海底地すべりの形状，長さ，厚さ，速度，水深等を変化させた約 6,000 ケースの津波計算を線形モデルにより実施し，発生直後の津波の最高・最低水位とパラメータの関係を解析した．波形の例を図 5 に示す．ピーク速度 u_p に対するフルード数 u_p/c が 1 を上回るケースは現実には稀と考えられるため，これらを除いて解析結果を解析したところ，水深，地すべり速度や，これらと関係するフルード数に対する感度が高いことが判った．また，地すべりの背後側と進行側に生じる津波の波長の合計はほぼ一定で，波速と地すべり移動時間の積の 2 倍となる．双方向の波長は，それぞれ，波速と地すべり移動時間の積に地すべり移動距離を加減したものとなることが確かめられた．

こうした検討をもとに，地すべりの移動と造波の関係についての概念モデルを検討した．まず，厚さ T ，長さ L の矩形地すべりが平坦な海底面上を $x>0$ の向きに距離 l だけ進行する

ことを考える．この移動に伴う海底変動は， $x>0$ 方向に無限長をもつ地すべりの移動による上昇と， $x<0$ 方向に無限長をもつ地すべりの移動による下降の和となる．前者により生じる下降波は矩形地すべり後端上で生じる下降波に，後者により生じる上昇波は矩形地すべり前段上で生じる上昇波に相当すると考えられる．理論的な考察に基づき，両方向に進行する波の波長の合計は，地すべり移動時間と波速に対して一定となることが見込まれた．また，上昇波と下降波の生成位置は常に地すべり長 L だけずれているので，上昇波と下降波の関係は図 6 のようになる．これらに基づき複数の無次元量を組み合わせた津波水位の推定式を導出した．この関係は，地すべり進行側において津波の増幅が大きい一部ケースを除き，比較的小さなばらつきで津波水位を説明できることが判った．

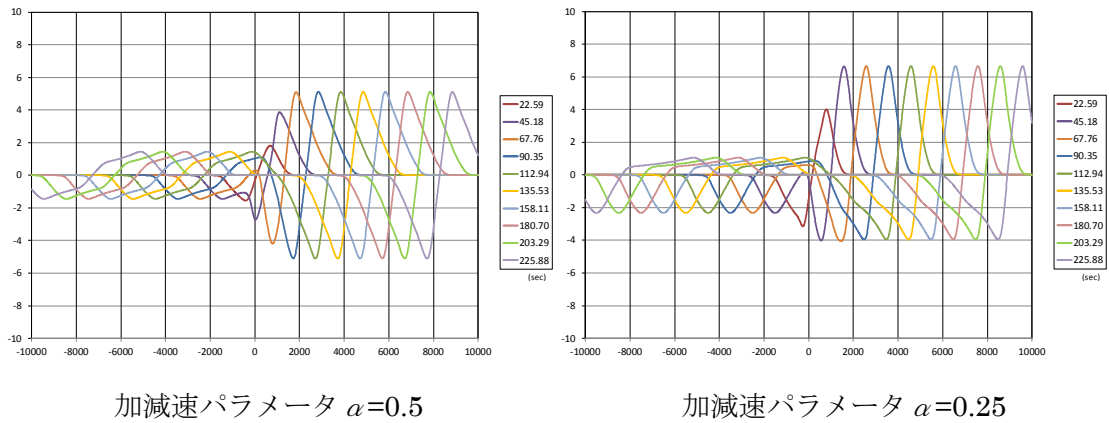


図 5 台形モデルによる波形の例($L_{mean}=1000\text{m}$, $T=20\text{m}$, $t_e=100\text{sec}$, $u_p=20\text{m/s}$, $h=200\text{m}$)

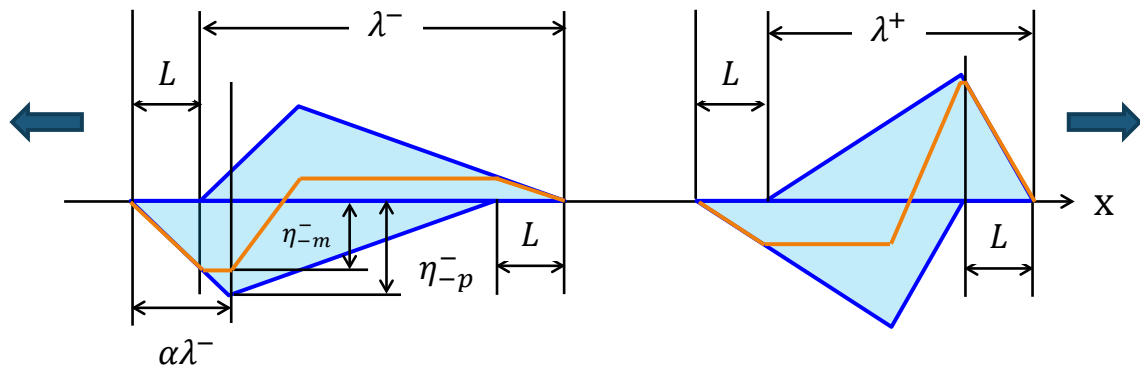


図 6 海底地すべりにより発生する波の位相関係と重畳の概念

さらに，地すべりの移動と造波の関係についての式と，水面応答に関する回帰式を組み合わせた津波水位推定式を作成した．式の構造として， $(H_{max_or_min})/T = F_1$ (瞬時の海底変

位に対する水面応答) ・ F_2 (地すべりの移動による津波の生成) と考える．このうち, F_1 は 3 章に示した Kajiura(1963)のフィルター効果であり,

$$\ln\left(\frac{|\eta_{\max} \text{ or } \eta_{\min}|}{T}\right) = \min[0, 0.0081\gamma^4 - 0.0182\gamma^3 - 0.1924\gamma^2 + 0.7279\gamma - 0.6488] \text{ (台形モデル)}$$

$$\ln\left(\frac{|\eta_{\max} \text{ or } \eta_{\min}|}{T}\right) = \min[0, 0.0049\gamma^4 - 0.0070\gamma^3 - 0.1620\gamma^2 + 0.6508\gamma - 0.7503] \text{ (三角形モデル)}$$

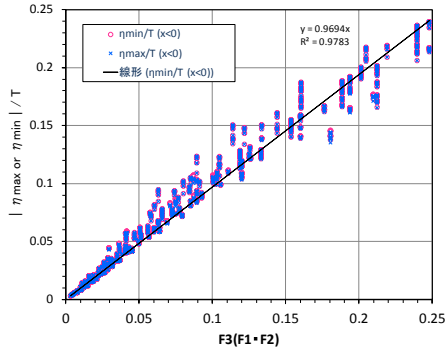
の関係とする．ただし, $\gamma = \ln\left(\frac{L_{\text{mean}}}{h}\right)$ である．

F_2 は上述の概念モデルに基づくもので, 向きと上昇・下降波ごとに形式が異なる．

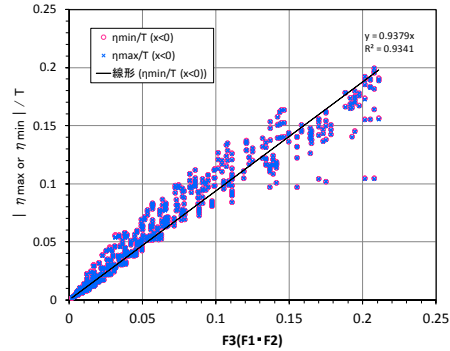
$$L \leq \alpha \cdot \lambda^- \text{ のとき : } \frac{\eta_{-m}}{T} = \left(\frac{\ell}{\lambda^-}\right)^2 \frac{1}{\alpha} \frac{L}{\ell} = \left(\frac{\overline{Fr}}{1+\overline{Fr}}\right)^2 \frac{1}{\alpha} \frac{L}{\ell}$$

$$L \geq \alpha \cdot \lambda^- \text{ のとき : } \frac{\eta_{-m}}{T} = \left(\frac{\ell}{\lambda^-}\right)^2 \frac{1}{1-\alpha} \frac{(1-\alpha) \cdot \lambda^-}{\ell} = \frac{\ell}{\lambda^-} = \frac{\overline{Fr}}{1+\overline{Fr}}$$

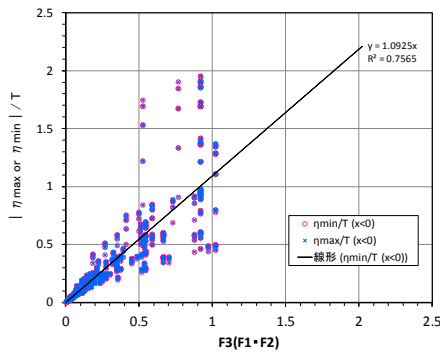
ここで, \overline{Fr} : 平均速度 \bar{u} に対するフルード数(= \bar{u}/c), λ^- : $x < 0$ 方向の津波波長, ℓ : 地すべり移動距離である．



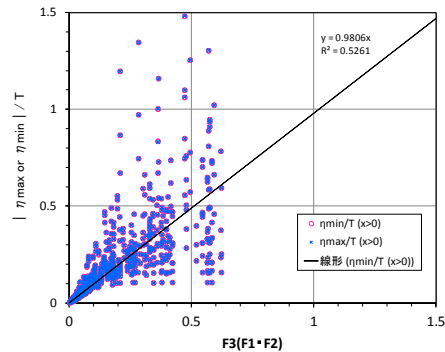
台形モデル (地すべり背後側)



三角形モデル (地すべり背後側)



台形モデル (地すべり進行側)



三角形モデル (地すべり進行側)

図 7 関数 $F_3(F_1 \cdot F_2)$ による最高最低水位／地すべり厚さの推定値と線形モデルの解析結果の対応

多数の計算結果に基づき係数を決定したところ、最終的に、台形モデルのとき、

$$F_3(F_1 \cdot F_2) = 0.6452 \cdot (F_1 \cdot F_2)^{0.8479} \quad (x < 0), \quad F_3(F_1 \cdot F_2) = 1.1026 \cdot (F_1 \cdot F_2)^{0.9361} \quad (x > 0)$$

三角形モデルのとき、

$$F_3(F_1 \cdot F_2) = 0.5047 \cdot (F_1 \cdot F_2)^{0.7404} \quad (x < 0), \quad F_3(F_1 \cdot F_2) = 0.6878 \cdot (F_1 \cdot F_2)^{0.7401} \quad (x > 0)$$

の関係が得られた。 F_3 と計算結果の対応は図 7 のようであり、地すべり進行側において津波の増幅が大きい一部ケースを除き、比較的小さなばらつきで津波水位を説明できる。さらに、既往水理実験 (Watts(1998)及び橋本・壇(2008)) の諸元に適用し、水理実験結果を概ね説明できることを確認した。

5. 退行性地すべりによる津波高さへの影響の分析

退行性地すべり (retrogressive landslide) とは、斜面下部から始まる地すべりで支持を失った上部斜面が順次滑ることにより滑落崖が後退する形態である (図 8 左)。その一例である 8200 年前にノルウェー沖で発生した巨大地すべり Storegga Slide は、津波堆積物に基づき北東大西洋沿岸で 20m を超える遡上高が推定されている。ここでは、退行性地すべりによる津波水位への効果をみるため、図 8 右のように地すべり体が分割し時間差をもって移動を開始する場合に生じる津波の解析を行った。

水深 h を 200m、一体時の地すべり平均長を 1000m、側面勾配 $\tan \theta = 0.2$ の台形モデルを用い、ピーク速度を $u_p = 20\text{m/s}$ とした解析を行った。地すべりの移動量は地すべり全長分の 1,000m とし、 $u_p = 20\text{m/s}$ 、 $t_p = 50$ 秒、及び $\alpha = 0.5$ とした。また、地すべり分割数 N を 1, 2, 3 ~ 9 の 9 通りとし、分割時の移動開始時間差 Δt を順次変化させて津波計算を行った。

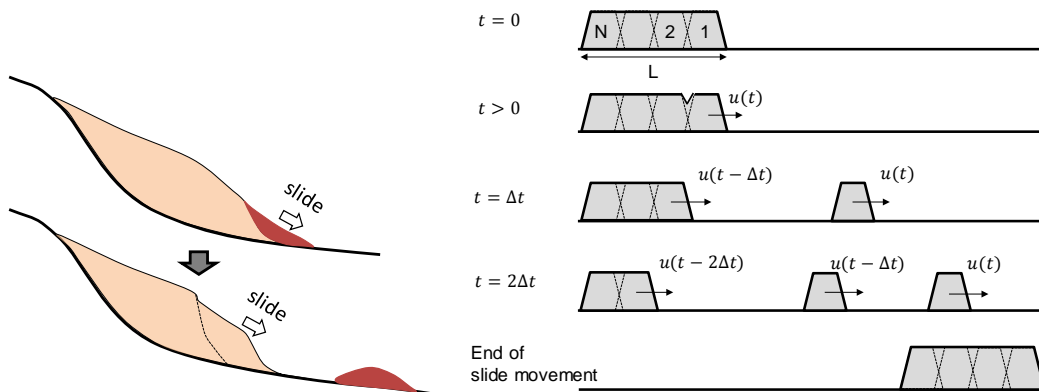


図 8 退行性地すべり移動様式と解析上の分割移動の模式図

移動開始時間差を変化させたときの最大水位の比較を図 9 に示す。縦軸は $N=1$ の時の水位、横軸は長波がブロック 1 個分を進む時間でそれぞれ無次元化している。一般に退行性は津波水位を低下させるが、地すべりの進行と逆方向 ($x < 0$) では、変動は、横軸の無次元時間が 1 前後、すなわち、ひとつ前のブロックの移動により造波された波が次のブロックの移動により造波される波とおおよそ同位相となる際にピークを取る分布となる。増幅率は 5 ~ 10% であるが、 N が 4 以上のとき分割数によらず約 10% でほぼ一定となる。

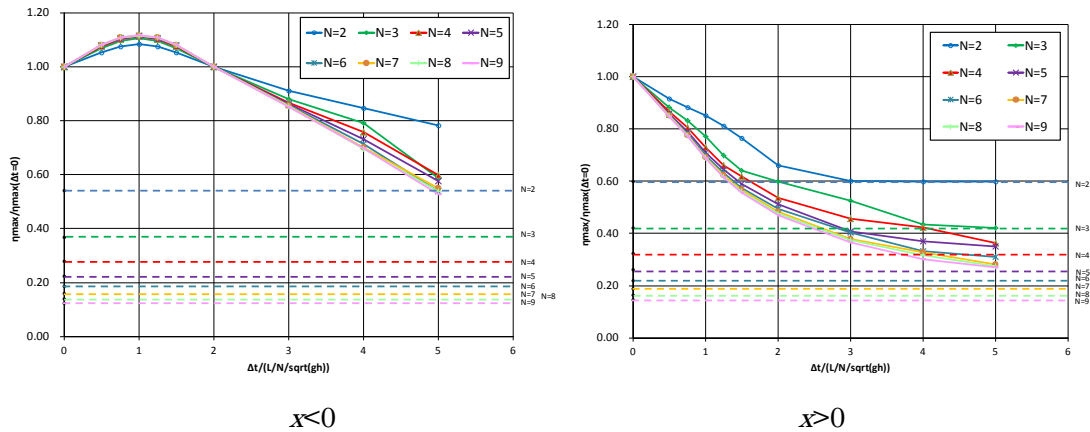


図 9 退行性地すべりのブロック分割数 N と時間差と最高水位の関係

6. 結論

地すべり諸元と津波高さの関係についてのパラメータスタディを効率的に実施するための数値解析手法の構築、及び多数の解析結果に基づく地すべりと津波高さの関係の分析を主な目的として数値解析及び理論的な分析を行った。そのために、一定水深の海域を 1 次元的に差分モデル化し、海底を地すべり体が移動する単純な基本問題を設定し、海底地すべりの形状、運動が津波の発生に与える影響を評価した。

まず、線形理論に基づき波形を運動学的に解くことにより、高速に津波の発生と伝播を解析できるモデルを構築した。このモデルは、水面に生じた波が均等に分裂し、正負の方向に長波の波速で進行するという前提に基づいており、波の粘性減衰や浅海域での波の前傾化及び波数分散効果は無視しているが、本研究の対象としている地すべり津波の波源付近においては、構築した線形モデルが有限体積法に基づく非線形モデルと整合する解を与えることを確認した。

海底地すべりでは、断層運動に起因する地殻変動に比べ海底変動の範囲がはるかに狭い範囲に集中するため、海底変動が海面変動に反映する際に短波長成分が除去される可能性があることを考慮し、水面応答に関するフィルターを導入した。このフィルターは、Kajiura (1963)が一様水深のもとで非圧縮非粘性流体を仮定した場合の海底変動に対する海面変位の理論解を導出したものである。この理論に基づき、海底変動の幅と水深に対する水面の応答を分析したところ、フィルターは空間的ローパスフィルターとして作用するため、波長の短い地すべり津波では水面応答におけるフィルター効果が有意となりやすいことが確認できた。次に、フィルターの離散式は無限級数の形式となっているが、積分回数を変化させた解析を実施し、数値解析上は積分回数を 50 以上とすれば無視できる誤差に収まることを明らかにした。また、フィルター効果が地すべり長さ／水深の関数としてよく表現できることを明らかにし、計算結果をもとに台形及び三角形の海底地すべりに対する推定式を導出した。この空間フィルターは本来、解析の時間ステップごとの海底変動に対するものであるが、地すべり体の初期形状に対して予め適用しフィルター後の地すべり形状を移動させることにより効率的に津波の発生を解析できることを津波の支配方程式に基づき理論的に導出し、数値解析により確認した。そのため、地すべりの移動範囲の水深変化が小さければ、この方法により精度を損ねることなく高速に解析を実施できる。

次に、地すべり体の長さ、厚さ、速度、加速度、水深等のパラメータを変化させた多数の解析を実施し、発生直後の津波の最高・最低水位とパラメータの関係を分析した。発生する津波の基本的なパターンは共通しており、地すべりの進行方向と逆方向で波の重畳パターンの違いにより波形が異なる。進行方向では押し波が、逆方向では引き波が先行する。各位置の上昇水位と下降水位は概ね同程度であるが、地すべり進行側では短波長かつ振幅が大きく、逆方向では逆の傾向となる。形状やパラメータを変化させた場合、台形モデルと三角形モデルでは波長や波形に明確な差異はない、地すべり長さが大きくなると波の振幅及び波長が大きくなる、最大速度が小さいとき波振幅は顕著に小さくなり波長は明瞭に伸張する、波長に関しては移動距離の影響が強い、上昇・下降水位とも地すべり速度と波速の比で表されるフルード数に対し明瞭に増大する等の傾向が明らかとなった。また、地すべりの加減速パターンに関しては、加速時間が短い場合に先行する波が大きくなることが解った。

これらを踏まえ、地すべりの移動と造波の関係についての概念モデルを検討し、それに基づき複数の無次元量を組み合わせた概念モデルを検討した。波長に着目すると、地すべりの背後側と進行側に生じる津波の波長の合計はほぼ一定で、波速と地すべり移動時間の積の 2

倍となる。双方向の波長はそれぞれ、波速と地すべり移動時間の積に地すべり移動距離を加減したものとなる。最終的に、地すべり移動距離、波長及び加減速パターンを用いて津波水位を推定できることを示した。この式は、フルード数の関数としても記述できるので、線形モデルによる解析結果の傾向を表現できると考えられる。この関係に基づく地すべりの移動と造波の関係についての式に、水面応答に関する回帰式を組合せた津波水位推定式を作成し、線形モデルを用いた計算結果に基づき係数を決定した。この関係は、地すべり進行側において津波の増幅が大きい一部ケースを除き、比較的小さなばらつきで津波水位を説明できることが判った。

最後に、地すべり体の変形のひとつとして、地すべり体が分割し小ブロックが時間差をもって移動を開始する退行性地すべりによる効果を解析した。海底地すべりが退行性を示すとき、津波のエネルギーが分散し津波発生効率が低下する場合が多く、地すべりの進行側では、津波波長の伸張と振幅の低下が生じる。 δ の増加に対し地すべり進行側では水位変動量が単調に減少し、一定値へと漸近する傾向が見られる。減少の度合いは分割数が大きい方が顕著であり、一定値への漸近もより速やかである。一方、背後側では、 δ が1前後、すなわち、1つ前のブロックの移動により造波された波が次のブロックの移動により造波される波とおおよそ同位相となる際にピークを取る分布となる。最大となるケースでは、一体型地すべりに対して増幅が見られる。増幅率は N が4以上のとき分割数によらず約10%で一定となる。こうした傾向は、線形モデル及び非線形モデルの解析結果に共通してみられた。一般には、一体的に滑る剛体運動のとき最も津波発生効率が低いとされるが、退行性を考慮すれば更なる増幅が見込まれることになる。海底地すべりは水深の大きい沖合に向かって進行することが通常であり、地すべり背後側は陸側に相当するため、沿岸防災の観点から留意が必要である。個別の地すべりにおいて退行性による増幅が生じる時間差は、長波の波速に基づき水深に応じ推定可能であるので、これを用いて津波の想定に反映することができる。

以上の研究を通じ、効率的に計算可能な線形モデルを用いて多数の解析を実施することにより、水面の応答、退行性を含む地すべりパラメータの影響を体系的に分析し、信頼度の高い発生津波水位の推定を可能とした。